

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 18120051301668

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

LD 泵浦全固体连续绿光激光器

LD Pumped All-Solid-State Green Laser

石梦静

指导教师姓名: 蔡志平 教授

专 业 名 称: 光 学

论文提交日期: 2008 年 月

论文答辩时间: 2008 年 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 6 月

LD Pumped All-Solid-State Green Laser

A Dissertation Presented

By

Shi Mengjing

Supervisor: Professor Cai Zhiping

Submitted to

the Graduate School of Xiamen University

for the Degree of

MASTER OF SCIENCE

Department of Physics, Xiamen University,

People' s Republic of China

June, 2008

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

激光二极管泵浦全固态激光器(DPSSL)具有效率高、寿命长、结构紧凑、稳定可靠等特点,已成为国际激光领域研究的热点。目前 Nd:YVO₄ 和 Nd:YAG 晶体以其优良的物理、化学及激光特性,被广泛的应用在各类激光产品中。本文对 LD 端面泵浦全固态 Nd:YAG/KTP、Nd:YVO₄/KTP 连续绿光激光器进行了理论对比和实验研究。

首先,回顾全固态激光器的发展历史;介绍绿光激光器的应用及发展现状。

其次,对比 Nd:YVO₄ 和 Nd:YAG 的晶体特性;对激光二极管端面泵浦 Nd:YVO₄/Nd:YAG 固体激光器的输入输出特性进行对比和理论研究,为实际优化设计激光器提供了依据。

第三,总结出影响腔内倍频的因素;首次分析了多层膜的反射特性对 II 类相位匹配倍频效率的影响;简单介绍 KTP 晶体的倍频特性,得出 Nd:YVO₄ 和 Nd:YAG 为激光晶体时 KTP 晶体的最佳长度。

第四,计算了 Nd:YVO₄ 和 Nd:YAG 晶体在不同泵浦功率下的热焦距,以及相关参数与热焦距的关系;利用 ABCD 矩阵对腔体稳定性进行分析,设计出在很大范围内保持稳定的热稳腔,从理论上实现了输出光斑的像散补偿。

最后,设计出方便调节的 LD 泵浦全固体连续绿光激光器。比较不同 KTP 长度下,Nd:YVO₄ 和 Nd:YAG 激光晶体的输入输出特性。采用简单的直腔设计,获得最大 4.18W 的绿光输出;采用 V 型腔设计,获得最高 17.8%的光-光转换效率,较好的实现了输出光斑的像散补偿。

关键词: 端面泵浦; 绿光激光器; KTP

Abstract

A laser diode(LD) pumped solid state four-level Nd^{3+} laser with intracavity frequency-doubling has proved to be an efficient way to achieve the green laser emission and has attracted more and more attention at present. It is due to its inherent advantages, which are characterized by its high output power, high quality of laser beam and low price. In this thesis, some theoretical and experimental researches are presented and valuable results are given.

Firstly, we analyze the theory of four-level system laser and obtain some parameters for optimizing the laser operation. In order to provide a good testimony for the actual work, the optimum values of the degree of mode matching of resonant light spot and pump light spot, the length of gain medium, the intracavity intrinsic loss, and the output mirror transmission have been obtained by numerical simulation.

Secondly, the principle of the frequency doubling is introduced. We also introduce the influence of phase-mismatch and the ways of achieving phase-match. After comparing some crystals we choose the KTP as the frequency doubling crystal in our design and introduce its attributes. As a result, we calculate and obtain the optimization length of the frequency doubling crystal.

Thirdly, the basis of the thermal lens effects and the influences of changing pump powers are studied. Using the ABCD theory to analyse the cavity, a thermally-insensitive folded cavity is designed, which overcomes thermal effects, decreases astigmatism without inserting compensators, adapts to high power LD end-pump mode.

The experiment of a LD end-pumped high power intracavity frequency-doubled green laser is demonstrated. The phase-matched properties of KTP crystal are studied. Using linear cavity, we get 4.18W/532nm maximal output power. Using V-fold cavity, high efficient, high powerful and stable TEM_{00} green laser is obtained..

Key Words: LD-pumped; Green Laser; KTP

目录

第一章 绪论	1
1.1 LD 泵浦全固体激光器(DPSSL).....	1
1.1.1 DPSSL 的发展历史.....	1
1.1.2 DPSSL 的特点.....	2
1.1.3 DPSSL 的发展方向及应用.....	3
1.2 绿光激光的产生方法及应用	4
1.2.1 绿光激光的产生方法.....	4
1.2.2 绿光激光的应用.....	5
1.3 LD 泵浦全固态绿光激光器的发展状况	6
1.4 本论文主要工作.....	8
第二章 激光晶体材料和四能级系统分析	9
2.1 激光晶体特性分析	9
2.2 激光器运转模型	14
2.2.1 速率方程.....	14
2.2.2 LD 端面泵浦固体激光器的输入输出特性.....	16
2.3 本章小结	20
第三章 二次谐波理论及倍频晶体的特性分析	21
3.1 二次谐波理论	21
3.1.1 非线性光学效应.....	21
3.1.2 倍频原理.....	22
3.1.3 影响倍频转换效率的因素.....	23
3.2 多层膜的反射特性对 II 类相位匹配倍频效率的影响	30
3.3 倍频晶体特性分析	33
3.3.1 KTP 晶体的特性分析.....	34
3.3.2 KTP 晶体的最佳长度分析.....	37
3.4 本章小结	39
第四章 热透镜效应及激光谐振腔体分析	41
4.1 光泵浦热效应	41
4.1.1 热透镜效应的理论分析.....	42
4.1.2 减小热透镜效应的方法.....	45
4.1.3 晶体制冷散热系统.....	46
4.2 激光谐振腔体分析	47
4.2.1 腔体传输矩阵分析.....	47
4.2.2 V 型腔腔体分析.....	49
4.3 本章小结	52

第五章 LD 端面泵浦全固体连续绿光激光器的实验研究	53
5.1 直腔绿光激光器	53
5.2 V 型腔绿光激光器	55
5.3 实验小结	58
第六章 总结与展望	61
参考文献	63
硕士期间完成论文	67
致 谢	69

CONTENTS

Chapter 1 General Review	1
1.1 LD Pumped All-Solid-State Laser(DPSSL)	1
1.1.1 History of DPSSL	1
1.1.2 Characteristic of DPSSL	2
1.1.3 Development & Applications of DPSSL	3
1.2 Applications & Ways of Achieving Green Laser	4
1.2.1 Ways of Achieving Green Laser	4
1.2.2 Applications of Green Laser	5
1.3 Development of Green Laser	6
1.4 Content of the Thesis	8
Chapter 2 Laser Material and Quasi-Four-Level System	9
2.1 Laser Material	9
2.2 Laser Operation Modeling	14
2.2.1 Rate Equation	14
2.2.2 Performance of the Laser	16
2.3 Summary	20
Chapter 3 SHG Principle and SHG Crystal.....	21
3.1 Second Harmonic Generation(SHG) Principle	21
3.1.1 Nonlinear Optical Effect	21
3.1.2 Frequency Doubling.....	22
3.1.3 Influences on Frequency Doubling Efficiency	23
3.2 Influence of the Output Mirror Polarization on SHG	30
3.3 SHG Crystal	33
3.3.1 KTP Crystal.....	34
3.3.2 The Prime Length of KTP Crystal	37
3.4 Summary	39
Chapter 4 Thermo-lens Effect and Cavity Design.....	41
4.1 Thermo-lens Effect	41
4.1.1 Theoretic Analyse of Thermo-lens Effect	42
4.1.2 Ways of Weakening Thermo-lens Effect.....	45
4.1.3 Coupling System.....	46
4.2 Cavity Analyse	47
4.2.1 Transfer Matrix Analyse	47
4.2.2 Three-mirror-fold Cavity Analyse	49
4.3 Summary	52

Chapter 5 Experiment of Green DPSSL.....	53
5.1 Experiment of Linear Cavity	53
5.2 Experiment of Three-mirror-fold Cavity	55
5.3 Summary	58
Chapter 6 Summary and Expectations.....	61
References	63
Published papers	67
Acknowledgements	69

第一章 绪论

激光作为 20 世纪人类重大的科技发明之一，以其无与伦比的技术优势继微电子技术之后，推动人类科学技术进入新的发展阶段，对人类的社会生活产生了广泛而深刻的影响。激光器的发光机制不同于普通光源，具有很好的方向性、单色性和相干性，故在现代科学技术的许多方面发挥了独特的作用，已经遍及工业、农业、科学、医学、通信、国防、信息及商业等诸多领域，并带动和导致了許多新兴学科的诞生和发展。随着非线性光学频率变换技术的日益成熟以及适合于 LD 抽运的固体激光材料的大量涌现，LD 抽运的各种波长的固体激光器已发展成为固体激光技术中最具活力的研究领域。特别是八十年代以后，随着晶体生长技术的提高和大功率长寿命 LD 的出现，LD 抽运的全固态激光器有了飞速的发展。LD 泵浦固体激光器 (DPSSL) 集半导体激光器和固体激光器的优点于一身，具有转换效率高、结构紧凑、可靠性高、寿命长以及良好的光束质量等优点，已成为当前激光产业的发展热点之一，其最高功率已达到了千瓦量级，并逐步实现设备的小型化和实用化。此外，结合非线性光学和频率变换技术，DPSSL 的输出波长可以覆盖紫外到红外的整个波段范围，拓宽了固体激光器的应用领域，在工业激光加工、激光医疗、激光显示、光通信、军事等多个领域具有广泛的应用前景。

1.1 LD 泵浦全固体激光器(DPSSL)

1.1.1 DPSSL 的发展历史

自 1960 年第一台红宝石激光器诞生以来，固体激光器的发展极为迅速，在不同领域，如材料加工、医学、测距及科学研究等方面有着广泛的用途。1960 年 Newman 第一个提出了全固态激光器的思想，并于 1963 年用 GaAs 二极管在 808nm 附近的辐射泵浦掺钕离子钨酸钙晶体(Nd:CaWO₄)，得到了 1064nm 的激光输出^[1]。1964 年，美国林肯实验室的 Keyes 和 Quist 研制出了第一台 LD 泵浦的固体激光器^[2]，它的工作物质为 GaF₂:U³⁺，输出波长 2613nm。1968 年，美国

麦道航空公司的 Ross 制造出了第一台用 GaAs 泵浦的 Nd:YAG 激光器^[3]，但其所需的 LD 必须被冷却到 170K，以实现波长匹配。

20 世纪 70 年代，虽然在新的固体激光材料开发、单元技术研究和应用开拓等方面取得了不少有意义的成果，但是由于 LD 泵浦源所具有的光束发散角大、单色性差、波长单调、功率和转换效率低以及难以在室温下运转等缺陷没有得到解决，DPSSL 技术基本上没有大的突破，它的性能特别是输出功率与灯泵浦的激光器相比还有很大的差距。

80 年代后期，高效率、高功率的 LD 及其阵列的发展，使得 DPSSL 技术重现了生机。新的晶体生长技术能生长出优质的量子阱和应变量子阱材料，使得 LD 的阈值电流明显降低，使用寿命显著增长，转换效率大幅提高，输出功率成倍增长。另外，新量子阱材料的发展使 LD 的激发波长得到了很大的拓宽，在室温下，覆盖范围已扩展到从蓝光到红外区域。高功率 LD 的发展，使 LD 泵浦固体激光器的工作也随之上了一个新台阶。

进入 90 年代后，由于 LD 的发展和 LD 泵浦固体激光器整体设计上的优化，LD 泵浦固体激光器有了很大进展，并且研究重点已转向小型化、实用化和商品化。国外的 Spectra Physics、SDL、Coherent 等公司分别推出了各种型号的连续和脉冲工作的 DPSSL 激光器；在国内，天津大学、清华大学、上海光机所、长春光机所、西安光机所、山东大学等单位也先后在 DPSSL 方面进行了许多有价值地研究^[4]。

目前，DPSSL 的斜率效可达 50%以上，电光转换效率也在 30-40%之间。在中小功率范围内，DPSSL 已在逐步取代灯泵的固体激光器、可见和紫外的氩离子激光器、氦镭激光器；同时，大功率 DPSSL 也正在逐步拓展应用领域。

1.1.2 DPSSL 的特点

LD 泵浦的固体激光器集二极管激光器和固体激光器的优点于一身，并且弥补了两者的不足，使得 LD 泵浦的全固态激光器优于传统灯泵固体激光器和二极管激光器本身，其各项性能指标以及在实现产业化方面都取得了极大的进步。概括起来有以下几点^[5,14,15]：

1. 总体效率高 全固态激光器的泵浦源 LD 可通过改变掺杂组分及控制温

度等手段使输出波长与激光晶体的吸收峰重合，热耗小，有利于泵浦光吸收，光-光转换效率高，总体转换效率可以达到 15%以上。

2. 稳定性好 LD 泵浦和单个谐振腔相结合的方式大大提高了固体激光器的稳定性，同时也能获得更窄的线宽。

3. 光束质量高，发散角小，具有高的空间相干性 激光晶体热负载的减小提高了光束质量。在纵向泵浦时，可以产生近于衍射极限的激光输出。DPSSL 输出光束是近于理想的 TEM_{00} 模，质量因子 M^2 接近衍射极限值 1。

4. 结构紧凑、小型化 LD 的集成化技术和易耦合的特点，从根本上简化了传统激光器的结构，使庞大的体积明显缩小，可靠性和实用性也得到了保证。

5. 可靠性高、寿命长 目前 LD 的寿命可达上万小时，而灯泵浦固体激光器的寿命通常只有 400 多小时。因此，选用 LD 泵浦的全固态激光器无论以连续还是脉冲方式工作，其寿命都可延长一个数量级以上。

6. 辐射线宽窄，易实现单频运转

7. 峰值功率高 由于固体激光介质的上能级寿命长，发射谱宽，能量储存能力高，易于实现粒子数反转，光增益大，而且通过调 Q 状态可产生高功率的脉冲输出。

8. 波长覆盖范围宽 LD 泵浦固体激光器通过采用不同的激光晶体以及频率变换技术，可以得到多种新的振荡波长，波长覆盖宽，而且可以利用多个 LD 泵浦，获得比单个 LD 大许多的输出功率；同时 LD 泵浦固体激光器还可以获得如双波长、可调谐等器件。

1.1.3 DPSSL 的发展方向及应用

当前，激光二极管泵浦全固体激光器的发展方向主要有四个方向：

- (1) 高功率输出；
- (2) 小型化\微型化；
- (3) 多波长输出；
- (4) 向多种激光材料发展。

激光二极管泵浦固体激光器由于其发射波长的谱线线宽窄($<2\text{nm}$)，因此易于与固体激光介质吸收峰值匹配，电光转换效率高，在相同的输出功率水平上，大

大减弱了热效应，易于实现稳定可控的单横模、单纵模输出。同时，激光二极管泵浦全固体激光器结构紧凑、体积小、光束质量好、输出功率稳定、寿命长。因此它广泛应用于材料加工，医疗卫生，军事国防，光学信息处理，光通信，彩色显示，激光测距等各个领域，从而成为国际上竞相研究开发的一个热点。

1.2 绿光激光的产生方法及应用

1.2.1 绿光激光的产生方法^[6]

(1) 上转换泵浦发射绿光激光 在固体材料中掺入稀土离子，用半导体激光器或其他光源泵浦，直接利用稀土离子的能级跃迁而产生绿光激光。此种方法基于上转换效应，亦即激射光波长小于泵浦光波长。稀土离子的上转换发光机制一般可以分为激发态吸收、能量转移和光子雪崩三种过程。

(2) 半导体激光器直接发射绿光激光 半导体激光器是以直接带隙半导体材料构成的 PN 结或 PIN 结为工作物质的一种小型化激光器。半导体激光器的激励方式主要有三种，即电注入式、光泵式和高能电子束激励式^[7]。按照波长和应用领域，半导体激光器大致可分为长波长和短波长两种^[8]。在短波长一侧，由于材料制备和器件工艺方面的困难，半导体绿光激光器的研究进展一直比较缓慢，很长时间没有达到实用化程度。

(3) 非线性光学晶体倍频方法 这是实现绿光激光较常用的方法。这种方法可分为直接法和间接法。直接法就是将半导体激光直接输入到波长变换元件上，倍频后得到绿光激光输出。这种方法特点是结构简单、倍频容易，而且变换频率高，但输出的绿光激光线宽较宽，波长稳定性差。间接法又可分为两种：a、利用半导体激光泵浦 Nd^{3+} 、 Er^{3+} 等稀土离子激活的固体激光器，然后再经过波长变换元件实现倍频。这种方法在结构上较为复杂，但可以得到好的激光光谱和波束特性。另外这种方法还可以利用固体激光器能级寿命长的优点，实现能量积累，从而得到高能量激光输出。b、利用既可发射激光、又可以同时实现波长变换的自倍频晶体材料实现激光输出，例如钕和氧化镁共掺的铌酸钾 (Nd:MgO:LiNbO_3) 和硼酸钕钪铝 ($\text{NdXY}_{1-x}\text{Al}_3[\text{BO}_3]$) 以及 KTP:Cr 等^[9]。

1.2.2 绿光激光的应用

目前,全固态激光器正朝着多波长方向发展,其中 LD 泵浦全固态绿光激光器发展迅猛,在各领域应用广泛。

1. 在医疗方面的应用^[6]

由于人眼对绿光最为敏感,532nm 波长的脉冲激光可用于眼科手术;该脉冲绿光亦可用于治疗血管性疾病,Endovasix 公司设计制造输出功率为 3W 的 532nm 调 Q 脉冲激光器用来治疗中风。脉冲绿光激光器因其功率高,所以对皮肤的作用时间相对较短,这样激光不会对目标组织周围的皮肤组织产生非选择性加热,从而不会导致热损伤,降低了手术危险性^[10]。

2. 在彩色显示领域的应用^[6]

与其它显示光源相比,激光显示技术具有色域宽、色纯度高、显示画面尺寸灵活可变、无有害电磁射线辐射等独特优点,可用于家庭影院、数码影院、超大屏幕投影、公众信息大屏幕以及教学演示、虚拟现实模拟等众多领域,成为家庭及室外未来首选的视频显示设备。激光显示的图像比现有彩色电视色彩更丰富、颜色更鲜艳,能反映自然界的真实色彩,甚至能显示虚拟颜色,所以大功率三基色全固态激光器作为激光彩色显示的关键技术,已成为当前国际激光领域研究的一个重大发展方向。

3. 在激光精密加工的应用^[11-12]

绿光激光由于其亮度高、聚焦光斑小、作用时间短、热影响区小、工件不会因加工而产生大的形变等优点,可以对一些硬度高、脆性大的材料进行加工,在精密加工中显示出它独特的优越性。除此之外,激光在电子工业中也得到广泛应用,可以用来调整微型电阻的阻值。随着激光器性能的改善和新型激光器的出现,激光在超大规模集成电路方面的应用已经成为许多其他工艺所无法取代的关键技艺,为超大规模集成电路的发展展现出令人鼓舞的前景。

4. 作为激光泵浦源^[13]

紫外激光器、深紫外激光器在军事、工业、医学、印刷等方面有着广泛的应用,使用绿光作为泵浦源是目前产生紫外、深紫外激光最有效、最广泛的方法。LD 泵浦的固体激光器可以作为飞秒激光器的泵浦源,如用绿光激光器作为泵浦源,泵浦 $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ 晶体产生飞秒脉冲。另外,绿光激光器还可作为参量振

荡器的泵浦源。

除此之外，全固体绿光激光器还在光存储、信息处理、激光光谱与全息、相干通讯、激光娱乐、激光雷达、干涉测量、光学数据存储、军事工业等领域也有着广泛的应用。因此，全固体绿光激光器具有十分重要的科学研究价值和广阔的应用前景。

1.3 LD 泵浦全固态绿光激光器的发展状况

第一台全固态小型绿光器件是利用线列发光二极管泵浦 Nd:YAG 和铌酸钡钠晶体($\text{Ba}_2\text{-NaNb}_3\text{O}_{15}$)倍频得到的，重复频率 100Hz，平均功率为 2mW^[14]。此后，国外 LD 端面泵浦腔内倍频全固体绿光激光器的研究进展迅速。

在连续绿光方面，1999 年日本 T.Kojima 等人将谐振腔改为四镜 Z 型折叠腔，YAG 双棒串接，获得光束质量较好的连续稳定的绿光输出，功率为 27W， M^2 等于 8；当输出为 TEM_{00} 模时，最大功率为 16W，对应的光-光转换效率分别为 8.2% 和 4.8%^[16]，这是采用棒状工作物质的传统全固态绿光激光器的最高功率。2001 年，D.Y.Shen 等人^[17]又采用二极管端面泵浦 Nd:GdVO₄/KTP，直腔结构，在注入功率为 8.4W 时，532nm 的功率输出达到 1.95W，光-光转换效率为 23.2%。同年，P.Dekker 等人^[18]利用自倍频晶体 Yb:YAB 实现了 1.1W 连续绿光输出，光-光转换效率为 10%，这是当时自倍频晶体输出绿光达到的最高功率， M^2 为 1.2。2004 年，相干公司推出了 18W 的全固态连续绿光激光器商用化产品。该产品采用 Nd:YVO₄/LBO 组合，环行腔结构，输出单纵模绿光，不仅避免了“多纵模竞争噪声”成为“安静”的商用化高功率激光器，同时得到了最高的泵浦转换效率，成为长期稳定性最高的固体激光器。2005 年，Xiaoyuan Peng 等人采用 Nd:YLF 晶体和临界相位匹配的 LBO 倍频晶体，采用双端泵浦，实现了 20.5W 的 527nm 激光输出， $M^2=1.2$ ，相应的光-光转换效率为 34.2%，绿光的功率不稳定性小于 1%^[19]。ELS 公司开发的 MonoDisk-515-MP 系列全固态 disk 激光器实现了 50W 的 515nm 连续绿光输出， $M^2<1.1$ 。

在准连续绿光方面，2000 年 Susumu Konno 等人采用双棒 L 型腔，当泵浦功率为 800W、重复频率 10kHz 时，用 LBO 晶体腔内倍频单端输出 138W 的绿光，光束质量因子 $M^2=11$ ^[20]；2001 年，美国 LLNL 的 Chang 等人报道，他们采

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库